

К. Д. Волков, Е. Н. Тарасов, А. В. Зинин, С. В. Андреев, А. С. Первушина

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗМОЛА НА МАГНИТНЫЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА $\text{Mn}_{55}\text{Al}_{45}$

В данной работе были проведены исследования влияния высоких энергий размолла на магнитные гистерезисные свойства сплава $\text{Mn}_{55}\text{Al}_{45}$. По результатам проведенных исследований можно говорить о том, что размол в атриторе, благодаря высокой интенсивности, позволяет достичь высоких значений коэрцитивной силы за короткое время.

Ключевые слова: *высокоэнергетический размол, магнито-твердый материал, ферромагнитная фаза, марганец-алюминиевый магнит.*

In this research we have investigated the effect of high-energy milling on the magnetic hysteresis properties of the $\text{Mn}_{55}\text{Al}_{45}$ alloy. Studies have found that we can say that attritor milling, due to the high intensity achieves the high coercive force in a short time.

Keywords: *high-energy grinding, magnetic material, ferromagnetic phase, manganese-aluminum magnet.*

Магнитотвердые материалы на основе MnAl обнаружили в 50-х годах прошлого столетия [1] и исследовались вплоть до конца 1980-х годов. Но их потенциал был реализован не полностью из-за непростой технологии получения. С открытием редкоземельных постоянных магнитов, с высокими магнитными характеристиками, интерес к безредкоземельным магнитам пропал.

В настоящее время из-за резкого увеличения цен на редкоземельные металлы, началось активное исследование магнитных гистерезисных свойств на основе MnAl с легирующими элементами как материалов для постоянных магнитов (ПМ). Данные соединения не содержат дорогие и дефицитные металлы, отличаются высокой коррозионной стойкостью, малым удельным весом (около $5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). Рассчитанное значение максимального энергетического произведения ПМ $(\text{ВН})_{\text{теор. max}} = 96 \text{ кДж/м}^3 \sim 12 \text{ МГсЭ}$ [2], превышает характеристики серийно выпускаемых ПМ из сплавов адьнико и бариевого феррита.

В системе MnAl магнитными свойствами обладает только τ -фаза при которой структура становится тетрагональной L1_0 . Для ее получения сплав гомогенизировался, а затем охлаждался на воздухе. Высококоэрцитивное состояние достигалось путем пластической деформации [3].

С возобновлением исследований в области безредкоземельных материалов, в частности систем MnAl , появилось множество вариаций технологии получения, но главным образом основной целью является получение высоких значений коэрцитивной силы и степени текстуры.

В связи с тем, что основным механизмом формирования высококоэрцитивного состояния в сплавах системы MnAl является деформация, в данной работе было исследовано влияние высокоэнергетического размола на гистерезисные свойства сплава $\text{Mn}_{55}\text{Al}_{45}$.

Образцы и методика эксперимента

Сплав состава (ат. %): 55 Mn, ост. Al был получен методом дуговой плавки в атмосфере гелия. Полученный литой образец был обработан при температуре 500°C в течение 30 мин. для формирования τ -фазы. Механический размол осуществлялся на высокоэнергетической шаровой мельнице типа «аттритор» в течение получаса с интервалом 5 мин., размалываемый материал представлял из себя порошок фракции 500–200 мкм, массой 8 г. В качестве размольного материала использовались шарики-подшипники диаметром 3 мм, общей массой 500 гр. Размол проводился в этиловом спирте, скорость вращения вертикальной лопастной мешалки — 4000 об./мин.

Измерение магнитных свойств образцов проводились на вибромагнетометре, в магнитных полях до 900 кА/м (12 кЭ) при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение

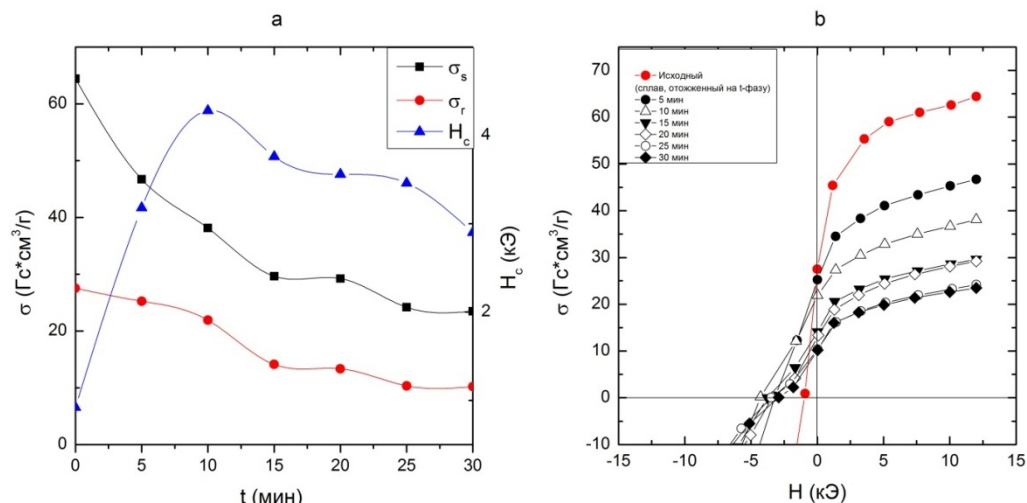


Рис. 1. а — зависимости удельной намагниченности насыщения σ_s , удельной остаточной намагниченности σ_r и коэрцитивной силы H_c от времени размола сплава $\text{Mn}_{55}\text{Al}_{45}$; б — кривые размагничивания образцов сплава $\text{Mn}_{55}\text{Al}_{45}$ подвергнутого механическому размолу

Полученные магнитные характеристики согласуются с результатами многих авторов по исследованию этих материалов: с уменьшением размера частиц происходит увеличение коэрцитивной силы H_c и уменьшение σ_s и σ_r (рис. 1а), а также возникновение перетяжек (рис. 1б). Падение σ , согласно [4], объясняют структурным

превращением, при котором часть атомов марганца занимает узлы типа $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2})$. При этом их магнитные моменты выстраиваются антипараллельно магнитным моментам атомов, находящихся в узлах $(0\ 0\ 0)$, что приводит к уменьшению суммарного магнитного момента. С увеличением концентрации антиферромагнитных дефектов, петля гистерезиса приобретает перетянутую форму. Коэрцитивная сила резко уменьшается при увеличении плотности дефектов и постепенно стремится к нулю. Такие петли гистерезиса были получены в работе [5] на поликристаллических образцах MnAl после сильной пластической деформации. В [6] отмечается, что такой перетянутый вид петли гистерезиса в сплаве MnAl наблюдается при наличии смеси — τ и ϵ' фаз при малой объемной доле τ -фазы.

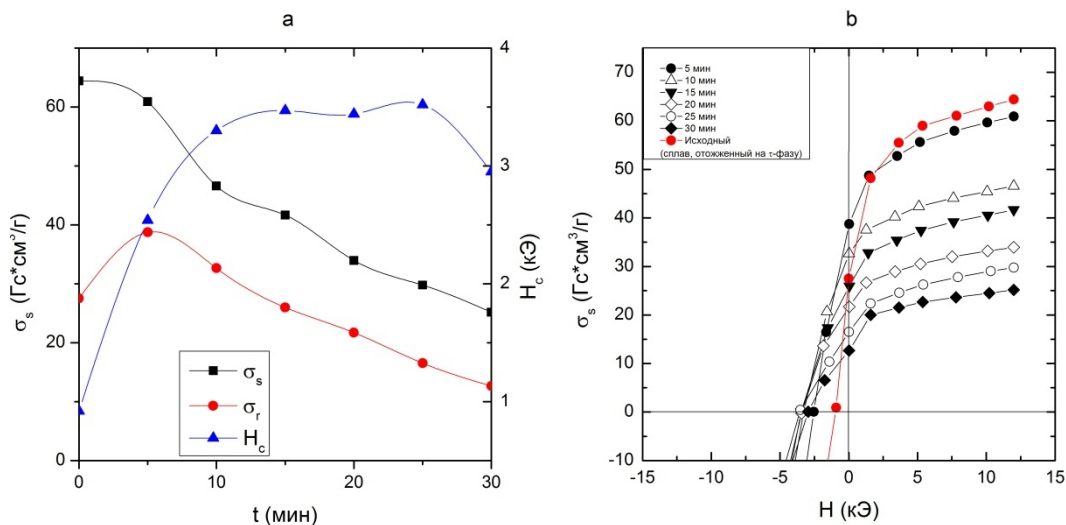


Рис. 2. а — зависимости удельной намагниченности насыщения σ_s , удельной остаточной намагниченности σ_r и коэрцитивной силы H_c от времени размола отожженного при 475 °С 30 мин. сплава Mn₅₅Al₄₅; б — кривые размагничивания образцов сплава Mn₅₅Al₄₅ подвергнутого механическому размолу и отожженного при 475 °С 30 мин.

По результатам измерения магнитных свойств отпущенных при температуре 475 °С в течение 30 мин образцов (рис. 2а) можно судить, что в процессе отжига происходит лишь частичное восстановления σ . Это может быть исправлено путем добавления легирующих элементов, например углерода или бора, которые стабилизируют ферромагнитную фазу. Изменение коэрцитивной силы обусловлено, как предполагается в работе [7], укрупнением зерна при термообработке, а как утверждается в [8] этот же фактор связан с исчезновением перетяжек на петлях (рис. 2б).

Выводы

В ходе исследования влияний высокоэнергетического размола на магнитные гистерезисные свойства сплава $Mn_{55}Al_{45}$ было определено, что высокие энергии при размоле позволяют получить высококоэрцитивное состояние за короткое время, даже по сравнению с планетарной мельницей согласно [9]. По результатам видно, что при размоле в атриторе, уже после 10 мин. наблюдается максимальное значение H_c , после чего начинается снижение. Термообработки не приводят к значительному улучшению свойств, что может быть связано с метастабильностью ферромагнитной фазы.

Литература

1. Копо Н. J. Phys. Soc. Japan, 1958. № 13. P. 1444.
2. Кекало И. Б., Самарин Б. А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. М.: Металлургия, 1989. С. 467.
3. Шангуров А. В., Тейтель Е. И., Ермаков А. Е., Уймин М. А. Влияние деформированного состояния на магнитную структуру сплавов MnAl-C. // Физика металлов и металловедение. 1985. Т. 60, вып. 6. С. 1171–1176.
4. Brown P. B., Goedkoop I. D. Acta Met., 1963. № 16. P. 737.
5. Мицек А. И., Семянников С. С. Влияние антифазных границ на магнитные свойства ферромагнетиков // Физика твердого тела. 1969. № 11. С. 1103–1113.
6. Лимбман М. А., Равдель М. П., Родина Т. С. О влиянии активных напряжений на образование упорядоченных фаз и магнитные свойства сплавов MnAl-C. // Металлы. 1987. № 3. С. 148–157.
7. Уймин М. А., Ермаков А. Е., Тейтель Е. И. Влияние структурного состояния на процессы перемангничивания сплава MnAl-C. // Физика металлов и металловедение. 1989. № 67. С. 915–923.
8. Тейтель Е. И., Уймин М. А., Ермаков А. Е. и др. Изменение структурного состояния и магнитных свойств при отжиге сильнодеформированного сплава MnAl-C // Физика металлов и металловедение. 1990. № 8. С. 83–89.
9. Jian H., Skokov K. P., Gutfleisch O. Microstructure and magnetic properties of Mn-Al-C alloy powders prepared by ball milling. Journal of Alloys and Compounds. 2015. № 622. P. 524–528.